

Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade
Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

ANALISI MEDIANTE MODELLI MATEMATICI DELLO SCARICO DELL'ACQUA DI
RIGASSIFICAZIONE DEL GNL E DEI FENOMENI DI RISOSPENSIONE DEI SEDIMENTI AL
FONDO

Prof. Ing. Francesco Gallerano (Responsabile Scientifico)

Ing. Enrico Pasero

Ing. Giovanni Pittalis

Ing. Giovanni Cannata

10 Settembre 2003

Indice

Sommario.

1. Introduzione

2. Caratteristiche dell'impianto off-shore e caratteristiche meteomarine della regione di mare interessata.

2.1 L'impianto off-shore: ubicazione e caratteristiche dello scarico.

2.2 La regione di mare interessata: batimetria, ventosità, moto ondoso, correnti marine, temperatura.

3. Descrizione dei modelli di simulazione.

3.1 Modello di corrente

3.2 Modello di diffusione termica e chimica mediato lungo la profondità

3.3 Modello tridimensionale per l'analisi della diffusione termica e chimica.

3.4 Modello per la valutazione dei fenomeni di risospensione di sedimenti dal fondo per effetto dell'azione combinata onde - corrente.

4. Risultati delle simulazioni

4.1 Campi di temperatura e di concentrazione di cloro alla grande scala in condizioni meteorologiche estreme.

4.2 Campi di temperatura e di concentrazione di cloro in prossimità dell'impianto in condizioni di calma di vento e di mare.

4.3 Valutazione dei fenomeni di risospensione del materiale solido.

5. Discussione e conclusioni.

Bibliografia

Sommario.

Il presente rapporto è relativo allo studio, effettuato mediante l'impiego di modelli matematici di simulazione, per la valutazione dell'impatto ambientale del Terminale marino per la rigassificazione di GNL (Gas Naturale Liquefatto) da realizzarsi in Alto Adriatico, ad Est di Porto Levante, nel punto di coordinate: Lat. 45° 05' 26'' N e Long., 12° 35' 05'E.

Nel rapporto vengono in particolare sviluppate le seguenti analisi:

- valutazione del massimo impatto, dello scarico dell'acqua di rigassificazione, in prossimità dell'opera (condizioni di minimo rimescolamento: calma di vento, corrente e moto ondoso) effettuata mediante l'impiego di un modello tridimensionale basato sulla risoluzione numerica delle equazioni del moto e di bilancio di massa mediante la tecnica ai volumi finiti;
- valutazione del massimo impatto, dello scarico dell'acqua di rigassificazione, in lontananza dall'opera effettuata mediante l'utilizzo di modelli di simulazione basati sulla risoluzione numerica delle equazioni del moto e di bilancio di massa mediate lungo la profondità;
- valutazione dell'entità dei fenomeni di risospensione del materiale solido prodotta dal moto ondoso significativo e dalle correnti, durante le operazioni di posa del terminale e della condotta di collegamento a terra.

Tali analisi sono state condotte sulla base della disamina delle caratteristiche dello scarico dell'acqua di rigassificazione e delle condizioni meteomarine significative della regione marina interessata.

I risultati delle simulazioni evidenziano come l'impianto non presenti, nelle condizioni esaminate ed in relazione ai processi di diffusione di inquinamento termico e chimico, un significativo impatto ambientale. Nel rapporto viene inoltre dimostrato che per dimensioni e ubicazione l'impianto non interferisce in modo significativo con le dinamiche costiere di deposizione, erosione e trasporto dei sedimenti marini.

1. Introduzione.

Il presente rapporto è relativo allo studio, effettuato mediante l'impiego di modelli matematici di simulazione, per la valutazione dell'impatto ambientale del Terminale marino per la rigassificazione di GNL (Gas Naturale Liquefatto) da realizzarsi in Alto Adriatico, ad Est di Porto Levante, nel punto di coordinate: Lat. 45° 05' 26'' N e Long., 12° 35' 05'E.

Nel rapporto vengono in particolare sviluppate le seguenti analisi:

- valutazione dell'impatto ambientale prodotto dall'immissione di scarichi termici e chimici (acqua di rigassificazione);
- valutazione dell'entità dei fenomeni di risospensione del materiale solido prodotta dal moto ondoso significativo e dalle correnti, durante le operazioni di posa in opera del terminale e della condotta di collegamento a terra.

La valutazione dell'impatto ambientale dell'impianto di rigassificazione off-shore con specifico riferimento all'inquinamento termico e chimico conseguente al rilascio di calore e di cloro, implica la necessità di valutare quantitativamente il campo di temperatura e di concentrazione delle sostanze immesse nell'ambiente che si determina in ragione dei processi di trasporto convettivo e diffusivo prodotti dalle correnti marine.

Due differenti situazioni debbono essere esaminate :

- l'impatto ambientale dovuto ai campi di temperatura e di concentrazione che si determinano durante i periodi di calma di vento, in assenza di moto ondoso, nell'immediato intorno dell'opera;
- l'impatto ambientale dovuto ai campi di temperatura e di concentrazione che si determinano in condizioni meteomarine estreme tali da produrre un trasporto di inquinanti tale da interessare in modo significativo la costa.

Nel primo caso tali campi debbono essere quantificati utilizzando schemi di rappresentazione in grado di cogliere in modo adeguato il carattere tridimensionale dei fenomeni idrodinamici e di

diffusione e trasporto che risultano anche influenzati dalle componenti barocliniche, che compaiono nelle equazioni del moto, prodotte dalle disuniformità della distribuzione di temperatura nel fluido ambiente in conseguenza di stratificazione termiche o di scarichi termici.

Nel rapporto vengono presentati i risultati di due distinte simulazioni relative, rispettivamente, ad una colonna d'acqua in condizioni non stratificate (situazione tipica invernale) ed in condizioni di forte stratificazione (condizione tipica estiva).

Tali simulazioni vengono effettuate assumendo condizioni di calma di vento e di moto ondoso, persistenti per due giorni.

Nel secondo caso in presenza di fondali di profondità limitata, come quelli caratteristici dell'Alto Adriatico, gli effetti di rimescolamento lungo la verticale prodotti da condizioni meteomarine estreme di moto ondoso e di vento, risultano di entità tale da giustificare l'utilizzo di schemi di calcolo che si basano sulla risoluzione delle equazioni del moto e di bilancio di massa mediate lungo la verticale. In tali condizioni questo schema di rappresentazione risulta sufficientemente accurato a quantificare l'entità dei processi di dispersione nell'ambiente marino della temperatura e delle sostanze chimiche.

Nel rapporto vengono descritti i risultati delle simulazioni effettuate per tre differenti condizioni meteo-marine: la prima è riferita ad un vento di direzione 90° N e ad un moto ondoso avente altezza d'onda pari ad 1 m, velocità del vento pari a 12 nodi e periodo di 6 secondi; la seconda è riferita ad un vento di direzione 60° N e ad un moto ondoso avente altezza d'onda pari ad 1.5 m, velocità del vento pari a 20 nodi e periodo di 6 secondi; infine la terza fa riferimento ad un vento di direzione 150° N e ad un moto ondoso avente altezza d'onda pari ad 1.5 m, velocità del vento pari a 16 nodi e periodo di 6 secondi.

Per mezzo delle condizioni meteo-marine le simulazioni hanno riguardato:

- la determinazione del campo d'onda;
- la determinazione del campo di corrente in presenza di vento e moto ondoso;
- la determinazione dei campi termici e di concentrazione.

La valutazione dell'impatto dell'opera in oggetto, in fase di esercizio e durante la posa in opera del terminale e della condotta di collegamento a terra, sulla dinamica dei sedimenti marini nella regione esaminata, richiede che sia valutata quantitativamente, la suscettibilità delle differenti

zone del fondale marino a fenomeni di erosione e di accrescimento, prodotti per effetto delle azioni di trasporto e risospensione delle correnti marine e del moto ondoso. E' evidente che tali fenomeni sono più intensi in condizioni meteo-marine estreme.

In questo rapporto, al fine di effettuare la suddetta valutazione di impatto ambientale, vengono eseguite, a partire dalle condizioni meteo-marine ritenute più significative della regione di mare esaminata (vento di direzione 60° N, moto ondoso: altezza d'onda di 1.5 m, velocità di 20 nodi e periodo di 6 secondi), delle simulazioni volte a quantificare i valori delle azioni tangenziali al fondo (velocità di attrito) prodotte dal moto ondoso e dalle correnti, nonché i valori delle concentrazioni di riferimento al fondo e medie nella colonna d'acqua in condizioni di equilibrio, così da fornire una indicazione quantitativa delle zone soggette a sensibili fenomeni di movimentazione dei sedimenti.

2. Caratteristiche dell'impianto off-shore: ubicazione e caratteristiche meteomarine della regione di mare interessata.

2.1 L'impianto di rigassificazione off-shore: ubicazione e caratteristiche dello scarico.

L'impianto off-shore di rigassificazione di GNL (Gas Naturale Liquefatto) da realizzarsi, è ubicato in Alto Adriatico, ad Est di Porto Levante, nel punto di coordinate: Lat. 45° 05' 26'' N e Long., 12° 35' 05'E. Tale ubicazione è mostrata in fig. 2.1.1; nella stessa figura viene riportato il tracciato orientativo della condotta di scarico a mare. L'impianto è costituito da due distinti moduli per un ingombro complessivo pari a circa 20000 m².

È previsto uno scarico a mare delle acque collocato a 3 metri di profondità sotto la superficie libera marina media. Lo scarico è caratterizzato da un flusso di 30000 mc/ora e da una variazione di temperatura pari a -4.6 °C. Tali valori sono stati assunti come dati di ingresso per le simulazioni matematiche concernenti la quantificazione dei campi di temperatura. In alcuni periodi dell'anno viene anche prevista l'immissione nelle acque di scarico di ipoclorito di sodio con una concentrazione variabile in funzione della richiesta specifica e comunque tale da rispettare i limiti di normativa allo scarico (0.2 ppm come Cl₂ attivo). La clorazione viene effettuata al fine di prevenire la formazione di organismi acquatici all'interno delle tubazioni dell'impianto stesso.

Le analisi sono state condotte considerando una concentrazione unitaria di 1 ppm. Questo al fine di dimostrare che anche con dosaggi significativi superiori al limite di normativa (0.2 ppm) si ottengono, nell'intorno del punto di scarico, concentrazioni molto basse.

2.2 La regione di mare interessata: batimetria, ventosità, moto ondoso e correnti marine.

La regione di mare interessata dalla presenza dell'impianto di rigassificazione è quella immediatamente prospiciente il tratto di costa compreso fra il Delta del Po e Porto Calieri.

La dinamica della circolazione costiera in tale regione risulta particolarmente complessa essendo il risultato dell'azione concomitante del moto ondoso, del vento, della marea e dei flussi di

origine fluviale dovuti alla presenza del Fiume Po, nonché dalla circolazione geostrofica alla grande scala.

Con riferimento a quanto riportato in un rapporto della SNAMPROGETTI (SNAMPROGETTI, 1986) si rileva come il regime medio annuo della ventosità sia caratterizzata da una prevalenza del vento proveniente da 60° N (Bora) presente nel 16% dei casi. Abbastanza frequenti risultano anche i venti da 150° N (Scirocco) osservati nell'11% dei casi.

La velocità massima dei venti di bora risulta pari a 44 nodi; l'83% di tali venti si presenta con una velocità minore di 20 nodi. Significativa è la percentuale di venti provenienti da 90° N pari al 7.60%. Si tratta comunque di venti dotati di minore intensità rispetto a quelli di bora, addensandosi le maggiori frequenze su di velocità intorno agli 8 nodi. La frequenza dei periodi di assenza di vento si colloca intorno al 22%.

Il moto ondoso è in stretta correlazione con il regime dei venti; infatti il moto ondoso prevalente che si presenta con più frequenza (21% in inverno, 13% in primavera, 10% in estate, 15% in autunno) è quello proveniente da 60° N il quale presenta anche le maggiori altezze d'onda (fino a 3 m.).

Il moto ondoso da 150° N è presente principalmente nelle stagioni intermedie con una frequenza dell'11-12%.

La marea dell'Adriatico non è la conseguenza diretta dell'effetto gravitazionale, ma la risposta del bacino all'oscillazione della superficie libera al contorno aperto rappresentato dalla sezione del canale di Otranto. Le oscillazioni hanno due periodicità tipiche di 12.5 e 24 ore che si propagano lungo il bacino modificandosi in ampiezza e creando campi di velocità in Alto Adriatico lungo la costa Italiana con velocità massime dell'ordine dei 10 cm/sec, valori questi in generale più modesti di quelli che si registrano in occasione di eventi estremi prodotti dal vento di bora.

La circolazione geostrofica dell'Adriatico, a prescindere dagli effetti della marea, delle sesse e dal vento, è dominata da un nucleo di acqua salata e densa che tende a risalire nell'Adriatico dallo Ionio attraverso il canale d'Otranto. Il dislivello generato dalle diverse condizioni di densità determina la circolazione fondamentale di questo mare, col concorso anche della forza di Coriolis causata dalla rotazione terrestre. A causa degli apporti di acqua dolce che si hanno nel bacino settentrionale, è sempre presente un pendio della superficie libera del mare principalmente in senso NW-SE. L'azione della forza di Coriolis fa sì che le acque uscenti fluiscano lungo le coste italiane e le acque entranti lungo le coste orientali. Flusso e deflusso non sono ovviamente costanti nel tempo e le correnti geostrofiche risultano in generale dell'ordine di grandezza di pochi centimetri al secondo con valori minimi in inverno e valori massimi in estate.

La dinamica della circolazione nella zona di mare interessata dall'impianto di rigassificazione è ovviamente influenzata dal flusso di origine fluviale prodotto dal fiume Po le cui portate risultano variabili fra i 700 mc/sec ed i 1500 mc/sec. La corrente che esce dal Po della Pila , allo sbocco è diretta verso Nord, poi assume una direzione circa NE fino a che perde la sua forza d'inerzia. A circa 15 Km dalla bocca prevale la corrente del normale circuito Adriatico, già descritta in precedenza, che si muove lungo il lato italiano dell'Adriatico verso SE.

L'analisi della distribuzione verticale delle temperature indica come nella regione di mare esaminata, caratterizzata da profondità dell'ordine dei 20-30 m, siano presenti stratificazioni termiche in primavera ed estate, con variazioni di temperatura fra la superficie e il fondo anche di 10 °C. In inverno la colonna d'acqua presenta una distribuzione verticale di temperature omogenea e pari a circa 10 °C.

Dall'analisi dei dati meteomarini disponibili emergono le indicazioni necessarie a definire le condizioni di ventosità e di moto ondoso, e di corrente più significative ai fini della valutazione dell'impatto ambientale dell'impianto di rigassificazione.

Per la determinazione delle variazioni di temperatura e dei campi di concentrazione di cloro prodotti dallo scarico dell'impianto, a distanza dal punto di immissione i dati meteorologici analizzati evidenziano come le condizioni più significative siano relative alle direzioni provenienza del vento e del moto ondoso dai quadranti NE-SE, e che si verificano in coincidenza con le portate di magra del Fiume Po il cui flusso tende a inibire il trasporto dell'inquinamento termico e chimico verso la costa. In occasione di eventi estremi la componente mareale del flusso risulta in generale trascurabile rispetto alle correnti prodotte dalle altre forzanti ambientali.

Tali eventi sono anche quelli che determinano i più intensi fenomeni di erosione e accrescimento dei fondali marini.

Per la determinazione dell'impatto ambientale nell'immediato intorno dell'opera le condizioni più significative da prendere in esame sono quelle relative a situazioni di calma di vento e di moto ondoso, la cui persistenza è dell'ordine di 24-48 ore. In tali condizioni risultano minimizzati l'entità dei processi di trasporto di temperatura e di cloro che sono da affidare essenzialmente alla circolazione geostrofica alla grande scala e all'azione dispersiva delle correnti di marea. In particolare vanno considerate le due situazioni estreme relative ad assenza di stratificazioni termiche ed in presenza di forti stratificazioni termiche.

3. Descrizione dei modelli di simulazione.

3.1 Modello di corrente

Nello studio di impatto ambientale in oggetto risulta necessaria la qualificazione:

- dei campi d'onda in grado di produrre condizioni critiche;
- della struttura delle correnti prodotte dal vento e da eventuali immissioni fluviali in relazione alla batimetrie delle regioni di mare analizzate.

I campi idrodinamici generati dall'azione di onde che incidono obliquamente la linea di costa sono caratterizzati dalla presenza di correnti parallele alla linea di costa le cui velocità presentano un profilo con un andamento dotato di un massimo in corrispondenza della linea di frangimento.

Longuet-Higgins (Longuet-Higgins, 1970) nello studio delle "Longshore currents", partendo dalla considerazione che le velocità parallele alla costa sono legate alla quantità di moto dalle onde incidenti, definisce una semplice relazione per determinare gli sforzi di radiazione in funzione della direzione e dell'altezza delle onde. Il valore della velocità della corrente è valutato da un'equazione di conservazione della quantità di moto nella quale viene imposto il bilancio, in condizioni stazionarie, tra la spinta prodotta dalle onde e la resistenza del fondale. Si tratta di un semplice approccio in grado di fornire risultati attendibili nel caso di correnti parallele a coste rettilinee in assenza di manufatti marittimi.

Allorquando la linea di costa presenta andamenti non rettilinei l'analisi delle correnti implica la simulazione dei campi di velocità in tutta la loro intrinseca caratteristica di bidimensionalità.

Cung-Shang e Liu (Cung-Shang, Liu, 1985) hanno affrontato il problema nella sua complessità; descrivono le correnti lungo la costa tramite la soluzione bidimensionale delle equazioni del moto integrate lungo la profondità, nelle quali sono state introdotte le sollecitazioni prodotte dalle onde ricavate da un modello di rifrazione del moto ondoso.

Cenedese e Gallerano (Cenedese, Gallerano, 1986) simulano le correnti prodotte dagli effetti combinati da vento e marea risolvendo, con tecniche alle differenze finite, le equazioni di continuità e di bilancio della quantità di moto, in funzione dell'elevazione dal fondo delle superficie libera e delle velocità mediate sulla profondità. Seguendo quest'ultima metodologia, è possibile misurare il campo di corrente dovuta all'azione combinata di vento ed onde introducendo nelle

proiezioni dell'equazione di conservazione delle quantità di moto le variazioni degli sforzi di radiazione prodotte da onde incidenti obliquamente la linea di costa.

L'analisi è effettuata tramite simulazione numerica del campo idrodinamico generato dall'azione combinata del vento, del moto ondoso e delle portate del fiume Po.

Tale studio è stato affrontato mediante l'utilizzo di un sistema di modelli che, partendo dall'analisi del moto ondoso attraverso le sue principali caratteristiche - altezza ed angolo di incidenza - definisce le variazioni della quantità di moto dell'onda incidente determinando così il tensore degli sforzi di radiazione; vengono poi integrate le equazioni di Navier-Stokes mediando le grandezze incognite sulla profondità, tenendo conto degli sforzi di radiazione e delle sollecitazioni dovute all'azione del vento.

L'effetto del moto ondoso nella formazione delle correnti in prossimità delle coste è esprimibile dalle variazioni delle componenti del tensore degli sforzi di radiazione S.

Le componenti del tensore di tali sforzi sono definibili secondo quanto derivato da Longuet-Higgins (Longuet-Higgins, 1970), per onde monocromatiche e per fondali degradanti dolcemente, dalle relazioni:

$$S_{xx} = \frac{E}{\rho} \left[\frac{C_g}{C} [1 + \sin^2 \phi] - \frac{1}{2} \right] \quad (3.1.1)$$

$$S_{yy} = \frac{E}{\rho} \left[2 \frac{C_g}{C} - \frac{1}{2} - \frac{C_g}{C} \sin^2 \phi \right] \quad (3.1.2)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \frac{E}{\rho} \left[\frac{C_g}{C} \sin \phi \cos \phi \right] \quad (3.1.3)$$

con:

C_g celerità di gruppo;

C celerità dell'onda;

ϕ angolo che la direzione di propagazione dell'onda forma con la normale alla linea di costa;

ρ densità del fluido;

E valore dell'energia media dell'onda per unità di superficie data da:

$$E = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (3.1.4)$$

H altezza d'onda.

Per definire le variabili presenti nelle equazioni (3.1.1), (3.1.2), (3.1.3) e (3.1.4) è necessario effettuare lo studio dell'evoluzione del moto ondoso tenendo conto dei fenomeni di rifrazione-shoaling e di diffrazione che intervengono con l'avvicinarsi del treno d'onda alla costa o a strutture marittime.

Il treno d'onda incidente non perpendicolarmente la linea di costa è soggetto a rifrazione-shoaling; tale fenomeno viene studiato mediante le equazioni che si ricavano partendo dalle seguenti ipotesi:

a) irrotazionalità del vettore numero d'onda \bar{k}

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{k} = 0 \quad (3.1.5)$$

posto $\theta = \phi + \frac{3}{2}\pi$, l'equazione (3.1.5) può essere scritta

$$\frac{\partial}{\partial x}(k \sin \theta) = \frac{\partial}{\partial y}(k \cos \theta) \quad (3.1.6)$$

b) conservazione dell'energia dell'onda, accettando di trascurare gli effetti di dissipazione prodotti dalla resistenza dei fondali e dai fenomeni di turbolenza, esprimibile con la

$$\frac{\partial}{\partial x}(H^2 C_g \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial y}(H^2 C_g \cos \theta) = 0 \quad (3.1.7)$$

E' da notare che la (3.1.7) perde di validità nella zona compresa fra la linea di frangimento e la costa dove i fenomeni di dissipazione di energia dovuti alla turbolenza prodotta dalla rottura dell'onda non possono essere più trascurati, ed è sostituita dalla relazione empirica proposta da

Longuet-Higgins (Longuet-Higgins, 1970) che lega l'altezza dell'onda direttamente alla profondità del fondale h :

$$H = \gamma h \quad (3.1.8)$$

con γ un coefficiente tra 0.5 e 1.

Definita una relazione fra celerità e numero d'onda:

$$C = \left[\frac{g}{h} \tanh(kh) \right] \quad (3.1.9)$$

$$C_g = \frac{1}{2} C \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2hk)} \right] \quad (3.1.10)$$

è possibile individuare l'evoluzione spaziale del moto ondoso modificato dall'effetto di rifrazione-shoaling risolvendo le equazioni (3.1.6), (3.1.7), (3.1.9) e (3.1.10).

Definito il campo d'onda è possibile dalle (3.1.1), (3.1.2) e (3.1.3) calcolare il tensore degli sforzi di radiazione S .

Le equazioni del moto per un flusso mediato lungo la profondità, ottenute una volta assunta l'ipotesi che le accelerazioni verticali siano trascurabili rispetto alle accelerazioni di gravità, si presentano nella forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial y} = 0 \quad (3.1.11)$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial(r^2/h)}{\partial x} + \frac{\partial(rs/h)}{\partial y} = A_h \left[\frac{\partial^2 r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 r}{\partial y^2} \right] - gh \frac{(h + Z_t)}{\partial x} - \frac{gr\sqrt{r^2 + s^2}}{X^2 h^2} + FVV_x - \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad (3.1.12)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial(rs/h)}{\partial x} + \frac{\partial(s^2/h)}{\partial y} = A_h \left[\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} \right] - gh \frac{(h + Z_t)}{\partial y} - \frac{gr\sqrt{r^2 + s^2}}{X^2 h^2} + FVV_y - \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \quad (3.1.13)$$

dove:

h è l'elevazione della superficie libera riferita al fondo;

Z_t è l'elevazione del fondo da un piano di riferimento;

A_k è il coefficiente di viscosità turbolenta;

V, V_x, V_y sono la velocità del vento e componenti nella direzione x e y ;

X è il coefficiente di resistenza di Chezy;

F è il coefficiente di trasmissione di sforzi all'interfaccia aria-liquido;

r, s valgono $u^* h, v^* h$

u, v componenti della velocità mediate sulla profondità nelle due direzioni x e y rispettivamente.

Il primo termine a secondo membro delle (3.1.12) e (3.1.13) rappresenta un termine dissipativo dovuto agli sforzi turbolenti; per la scelta del valore del coefficiente di viscosità turbolenta adottato nella simulazione dei campi idrodinamici per tener conto dei fenomeni turbolenti su piccola scala è stata adottata la metodologia proposta da Falconeer (Falconeer, 1980). Assumendo che la lunghezza di mescolamento l venga espressa dalla relazione:

$$l = K_v h \left(1 - \frac{z}{h}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1.14)$$

con K_v costante di Von Karman e z la quota rispetto al fondo, e formulando l'ipotesi che il profilo di velocità nel piano verticale possa essere adeguatamente rappresentato da una legge logaritmica, si determina la distribuzione lungo la verticale del coefficiente di viscosità turbolenta (utilizzando l'ipotesi della lunghezza di mescolamento di Prandtl), che integrata sulla verticale fornisce il coefficiente di viscosità turbolenta medio:

$$A_k = \frac{K_v \sqrt{gh^2(u^2 + v^2)}}{6X} \quad (3.1.15)$$

La procedura esposta consente di assumere quindi tale coefficiente variabile nel dominio bidimensionale in funzione della velocità media, della profondità nonché del coefficiente di resistenza di Chezy.

Il terzo termine a secondo membro delle (3.1.12) e (3.1.13) rappresenta la resistenza al moto prodotta dal fondale ed è funzione della velocità del punto. Il quarto termine esprime invece gli effetti prodotti dal vento, mentre gli ultimi due rappresentano le variazioni delle componenti del tensore degli sforzi di radiazione.

Le (3.1.11), (3.1.12) e (3.1.13) consentono di definire l'elevazione della superficie libera ed il campo di velocità in condizioni non stazionarie prodotti dal vento e dagli sforzi di radiazione.

Le equazioni di Navier-Stokes per flussi bidimensionali mediati lungo la profondità necessitano, per essere risolte, l'imposizione di condizioni al contorno sulle velocità e sull'elevazione della superficie libera. Le condizioni sulla linea di costa non presentano particolare difficoltà, in quanto sono esplicitate nella forma di valori nulli per le velocità, e di gradienti nulli lungo la normale al contorno per l'elevazione della superficie libera.

Passando a considerare i contorni in mare aperto, la questione si presenta più complessa. Le uniche condizioni che possono essere ritenute ragionevoli, sulle velocità e sull'elevazione della superficie libera, sono quelle di gradienti nulli lungo le normali alla linea di contorno.

Nella soluzione del sistema di equazioni presentato le difficoltà consistono nella definizione di schemi numerici che godano dei requisiti della consistenza e della stabilità.

Lo schema alle differenze centrate, utilizzato per discretizzare le equazioni (3.1.11), (3.1.12) e (3.1.13) si presenta nella forma MAC con i valori delle portate e della profondità definiti in punti non coincidenti.

Viene utilizzato un metodo numerico implicito per la soluzione del sistema di equazioni che consiste nel risolvere simultaneamente le (3.1.11) e (3.1.12) e successivamente le (3.1.11) e (3.1.13).

3.2 Modello di diffusione termica e chimica mediato lungo la profondità

La struttura della corrente in una regione costiera è una complessa composizione di moti ordinati e di moti disordinati; da un lato, infatti, ci possono essere strutture alla grande scala generate dal moto delle maree, dalle variazioni della densità o da effetti atmosferici, mentre dall'altro esistono piccoli vortici turbolenti generati dal meccanismo a catena non lineare della turbolenza. A scale intermedie ci sono i moti legati alla configurazione geometrica, alle onde, alle maree ed agli sforzi al fondo.

Ciascuno degli aspetti precedentemente considerati ha importanti implicazioni nella distribuzione di particelle solide, sale, calore e soluti. Moti a grande scala sono convettivi e modificano i campi di concentrazione nel loro insieme con distorsione molto bassa; i piccoli vortici, d'altra parte, sono diffusivi e tendono a ridurre i gradienti di concentrazione. Per piccoli vortici si intendono vortici che sono piccoli rispetto alla dimensione della griglia del dominio di discretizzazione. Fortunatamente non è necessario modellizzare la struttura completa della corrente. Gli effetti della convezione sono usualmente predominanti e, sotto l'ipotesi che la quantità di materia trasportata è abbastanza miscelata lungo la profondità, è sufficiente considerare le equazioni mediate lungo la profondità.

In tali circostanze la concentrazione e il moto di un inquinante o di altre specie è governato da un'equazione che è semplicemente un'espressione matematica del principio di conservazione della massa. I due principali processi rappresentati nell'equazione di bilancio di massa sono la convezione attraverso la corrente e la diffusione attraverso le fluttuazioni turbolente. Per gli inquinanti non conservativi si tiene conto anche di un termine di ossidazione o decadimento. Tale equazione si presenta dunque nella forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(dC) + \frac{\partial}{\partial x}(duC) + \frac{\partial}{\partial y}(dvC) = \frac{\partial}{\partial x}\left(dD \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(dD \frac{\partial C}{\partial y}\right) - kCd + \frac{S_c}{\Delta s^2} \quad (3.2.1)$$

dove:

C è la concentrazione o la temperatura mediata lungo la profondità;

k è la costante di decadimento della specie;

u,v sono le componenti cartesiane della velocità mediate lungo la profondità;

D è il coefficiente di dispersione;

(x,y) sono le coordinate cartesiane nel piano orizzontale;

t è il tempo;

d è la profondità dell'acqua;

S_C è la portata di massa dell'inquinante (nulla ovunque, eccetto che nelle celle di immissione);

Δs è la dimensione della griglia del modello.

In particolare $S_C = QC_0$

avendo indicato con:

Q la portata di immissione;

C_0 la concentrazione del cloro all'immissione.

L'output del modello consiste in valori di concentrazioni a prefissati intervalli temporali lungo la durata del test in ogni cella del dominio. Le correnti convettive di inquinanti o altre specie sono ottenute dal modello di corrente descritto nel paragrafo precedente.

I processi importanti che governano la dissipazione finale del calore immesso continuamente da processi industriali in mare sono la dispersione attraverso le correnti marine ed il raffreddamento attraverso gli scambi con l'atmosfera. In queste condizioni, la temperatura mediata lungo la profondità soddisfa l'equazione

$$\frac{\partial}{\partial t}(dT) + \frac{\partial}{\partial x}(duT) + \frac{\partial}{\partial y}(dvT) = \frac{\partial}{\partial x}\left(dD \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(dD \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{H - KT}{\rho c_p} + \frac{S_T}{\Delta s^2} \quad (3.2.2)$$

dove

K è il fattore di raffreddamento atmosferico;

H è la sorgente di calore per unità di area;

ρc_p è la capacità termica specifica;

$S_T = Q\Delta T$ (nulla ovunque, tranne che nelle celle di immissione);

dove ΔT indica la differenza di temperatura tra il fluido ambiente e il fluido immesso.

Lo scambio di calore netto attraverso la superficie libera è determinato da un bilancio fra i processi di radiazione, conduzione ed evaporazione. Le principali sorgenti di calore che influenzano la temperatura alla superficie libera di un corpo idrico naturale sono le radiazioni a bassa lunghezza

d'onda (ϕ_{sn}), emesse principalmente dal sole, e le radiazioni ad elevata lunghezza d'onda (ϕ_{an}), provenienti dall'atmosfera. Il suffisso n è usato per denotare che queste quantità sono espresse al netto della parziale riflessione da parte della superficie libera. I maggiori processi che rimuovono calore dal corpo idrico sono le radiazioni nere ad alta lunghezza d'onda (ϕ_{bn}) provenienti dall'acqua stessa, l'evaporazione (ϕ_e), la conduzione (ϕ_c). Quindi il flusso netto è dato da:

$$\phi_n = \phi_{sn} + \phi_{an} - \phi_{bn} - \phi_e - \phi_c \quad (3.2.3)$$

e dipende dalle condizioni meteorologiche (radiazione, temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità del vento) e dall'effettiva temperatura dell'acqua. Queste condizioni meteorologiche sono in continua variazione, e sebbene il modello di trasporto del calore nella presente forma non sia adatto a simulare le variazioni giornaliere di temperatura legate alle variazioni di tali grandezze, è talvolta possibile modellizzare le variazioni di temperatura durante periodi di rapido riscaldamento o raffreddamento specificando un appropriato valore o una relazione per H. Comunque, nello studio di un corpo idrico soggetto ad un flusso di calore, è pratica comune considerare le differenze di temperatura con la stazione di immissione e usare un approccio linearizzato per il raffreddamento atmosferico. Il fattore risultante di riscaldamento K ($W/m^2/C^\circ$) offre un ulteriore raffreddamento rispetto all'immissione, da aggiungere al naturale raffreddamento o riscaldamento dell'acqua. I valori di K sono di solito fissati per determinati intervalli di temperatura del mare e velocità del vento.

L'aggiunta di calore proveniente da uno scarico è implementata nel modello specificando incremento termico e portata provenienti dallo scarico; si ipotizza che il calore aggiunto sia abbastanza miscelato lungo la verticale ed uniformemente distribuito nella cella del dominio corrispondente all'immissione.

3.3 Modello tridimensionale per l'analisi della diffusione termica e chimica.

La simulazione dei campi di velocità di temperatura e di concentrazione è effettuata utilizzando le equazioni di continuità, di bilancio della quantità di moto, di bilancio dell'energia e di bilancio di massa scritte per un dominio tridimensionale, una volta definite le opportune condizioni al contorno. Il fluido è supposto incompressibile in regime turbolento.

Nella definizione del modello vengono assunte le seguenti ipotesi (Simon T.J., 1973; Sundemann J., 1983; Tjomsland T., 1979; Wittmiss J., 1983):

- le variazioni di densità intervengono solo nei termini legati alle forze di galleggiamento (ipotesi di Boussinesq); mentre l'equazione di continuità è quella tipica di un fluido incompressibile;
- in virtù dell'ipotesi precedente la componente verticale delle velocità in corrispondenza delle interfacce viene determinata dall'equazione di continuità che viene usata anche per definire le sopraelevazioni della superficie libera.

L'equazione di continuità può essere formulata in termini di divergenza nulla della velocità:

$$\left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] = 0 \quad (3.3.1)$$

dove x e y sono le coordinate orizzontali nelle direzioni dei paralleli e dei meridiani, z è la coordinata verticale; u, v e w sono le componenti della velocità media.

L'equazione di bilancio della quantità di moto proiettata sugli assi coordinati può essere scritta nella seguente forma, tenendo conto della turbolenza mediante l'introduzione di opportuni coefficienti di diffusività turbolenta

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + K_0 \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + K_z \left[\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (3.3.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(wv)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + K_0 \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + K_z \left[\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (3.3.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + K_0 \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] + K_z \left[\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (3.3.4)$$

con

ρ densità;

p pressione media;

g accelerazione di gravità.

L'equazione di bilancio dell'energia termica assume la seguente forma

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = +K_0 \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + K_z \left[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3.3.5)$$

con

T temperatura media.

L'equazione di bilancio della concentrazione di cloro assume la seguente forma

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} + \frac{\partial(wc)}{\partial z} = +K_0 \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right] + K_z \left[\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] \quad (3.3.6)$$

con

c concentrazione di cloro.

L'introduzione dell'approssimazione di Boussinesq ha consentito di porre nelle equazioni precedenti nulla la divergenza della velocità dato che le variazioni di densità intervengono solo nella definizione delle forze di galleggiamento. Dal momento che nella maggior parte dei sistemi idrici naturali (mari e laghi in particolare) si hanno velocità orizzontali molto maggiori di quelle verticali ed è inoltre lecito trascurare le accelerazioni lungo la verticale rispetto all'accelerazione di gravità, la proiezione secondo l'asse z dell'equazione di bilancio della quantità di moto integrata lungo la verticale porta a

$$p = p_s + \rho g(\xi + z) \quad (3.3.7)$$

dove:

p_s pressione atmosferica all'interfaccia aria-liquido;

ξ sopraelevazione delle superficie libera;

z profondità

L'equazione di stato, nell'ipotesi di trascurare gli effetti delle variazioni di pressione sulla densità, consente di porre in relazione l'anomalia della densità con quella della temperatura:

$$\sigma = -\varepsilon \theta^2 \rho_0 \quad (3.3.8)$$

con

$\sigma = (\rho - \rho_0)$ anomalia di densità;

ε costante;

$\theta = (T - T_0)$ anomalia della temperatura;

T_0 Temperatura di riferimento;

ρ_0 Densità di riferimento.

E' possibile considerare il valore della pressione come somma di due termini:

-quello barotropico, dipendente solo dalle condizioni in superficie assunto variabile linearmente nello strato

$$\psi = p_s + \rho_0 g(\xi + z) \quad (3.3.9)$$

- quello baroclinico legato alla distribuzione dei valori della densità sulla verticale:

$$\phi = g \int_z^\xi \sigma dz \quad (3.3.10)$$

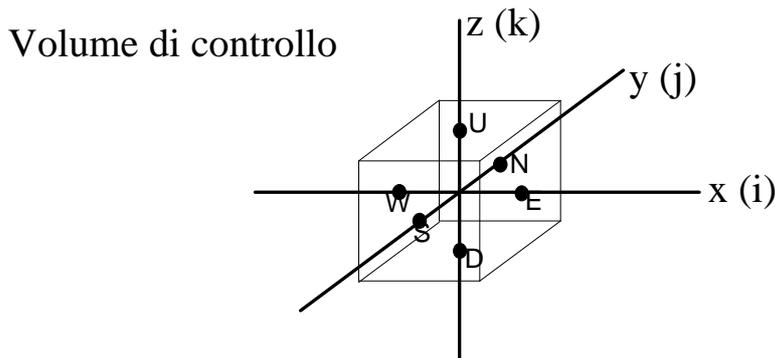
Tenendo in conto anche gli effetti della distribuzione della densità sulla verticale l'equazione (3.3.9) può quindi essere scritta:

$$p(z, \rho, (\theta)) = \psi + \phi \quad (3.3.11)$$

Le equazioni descritte vengono integrate numericamente tramite la tecnica dei volumi finiti; secondo tale tecnica, il dominio di calcolo viene suddiviso in celle di forma qualsiasi (generalmente esaedri), non sovrapposte e che lo coprano interamente, potendo dar luogo ad un reticolo strutturato oppure non strutturato, sulle quali è possibile operare direttamente senza necessità di effettuare trasformazioni di coordinate.

Ad ogni cella vengono applicate le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, al fine di determinare le variabili del campo di moto in alcuni punti delle celle, detti nodi, che possono essere ad esempio i centroidi delle celle, i vertici delle celle, i centroidi delle facce, i centri degli spigoli.

Nelle sue linee essenziali, il metodo dei volumi finiti consiste dunque nel risolvere in forma discreta le equazioni del moto espresse in forma integrale sul volume di una cella di calcolo e trasformando per mezzo del lemma di Green gli integrali di volume in integrali di superficie; in questo modo le equazioni vengono espresse in termini di flussi di quantità di moto e di massa che le celle scambiano attraverso le superfici di interfaccia; ciò conferisce al metodo ottime proprietà di conservazione e consistenza.



Il metodo dei volumi finiti può essere applicato a reticoli staggered o non-staggered; quest'ultimo schema risulta vantaggioso in quanto: a) tutte le variabili sono applicate negli stessi punti, b) i contributi convettivi ai coefficienti dell'equazione discretizzata sono gli stessi per tutte le variabili, c) risulta più semplice l'implementazione del metodo su grigliati non strutturati (Peric *et al.*, 1988).

I campi idrodinamici che si realizzano in mare, prodotti dalle forzanti ambientali, possono pertanto essere calcolati utilizzando il metodo di discretizzazione ai volumi finiti su di un reticolo di calcolo non-strutturato e non-staggered. Velocità, concentrazioni e temperature vengono definite in corrispondenza del centro di ciascuna cella, mentre i flussi vengono definiti in corrispondenza delle facce della cella.

La procedura messa a punto consente inoltre di superare efficacemente i problemi legati alla presenza della superficie libera, la cui evoluzione può essere direttamente calcolata dal valore dei flussi che la attraversano, e che consiste nell'assumere ad ogni istante di discretizzazione temporale la superficie libera stazionaria, ma permeabile al flusso. La nuova posizione della superficie libera viene calcolata in funzione del flusso di liquido che ha attraversato tale superficie e dell'area della faccia superiore delle celle superficiali.

Tale procedura nei fatti si traduce nell'imporre le condizioni al contorno sulla superficie libera mediante la condizione dinamica, e nell'individuare la nuova posizione della superficie libera in base alla condizione cinematica.

Il metodo dei volumi finiti prova dunque a combinare i vantaggi del metodo agli elementi finiti, cioè la flessibilità geometrica, e la conseguente grande adattabilità a domini di forma complessa, con quelli del metodo alle differenze finite, cioè la flessibilità nella definizione del reticolo di calcolo per ogni variabile del campo di moto.

Di contro tale metodo presenta delle difficoltà nella definizione delle derivate: infatti, poiché la griglia di calcolo non è necessariamente ortogonale ed equamente spaziata (come nel metodo delle

differenze finite), è impossibile definire una derivata di una funzione in base all'espansione di Taylor, ma occorre mediarla su un opportuno volume di controllo, con la necessità di effettuare interpolazioni per calcolare i valori della funzione in particolari punti del dominio non appartenenti al reticolo di calcolo.

Dettagli sulle caratteristiche di tale metodo e esempi di applicazione sono riportati in (Fletcher, 1987; Vinokur, 1989; Peric *et al.*, 1988; Vreman *et al.*, 1992; Morton, Paisley, 1989; Vijayan, Kallinderis, 1994; Wang, Widhopf, 1989; Simoneau, Pollard, 1994; Hortmann *et al.*, 1990; Na, Yoo, 1991; Zang *et al.*, 1994; Gallerano *et al.*, 1996).

3.4 Modello per la valutazione dei fenomeni di risospensione di sedimenti dal fondo per effetto dell'azione combinata onde - corrente.

Il problema principale di questo genere di studi è quello legato alla definizione della zona in cui è presente la risospensione delle particelle solide prodotta dall'azione della corrente e dal moto oscillatorio causato dalle onde. Queste ultime determinano una distribuzione dei solidi prevalentemente concentrata in prossimità del fondale mentre una corrente sostanzialmente stazionaria produce una distribuzione delle concentrazioni dei solidi che interessa l'intera profondità del flusso.

Assumendo una distribuzione logaritmica delle velocità, sia nella zona dove è prevalente l'azione esercitata dalle onde sia nella restante parte del flusso, e utilizzando l'equazione di bilancio della quantità di moto nello strato limite turbolento prodotto dal moto ondoso si ottiene:

$$-u_f^2 = - \int_{k/30}^{\sigma+k/30} \frac{\partial}{\partial t} \left[u_0 - \frac{u_r}{k_v} \ln \left(\frac{z}{k/30} \right) \right] dz \quad (3.4.1)$$

ove:

- σ = spessore dello strato limite turbolento;
- $u_0 = u_{1m} \sin(\Omega t)$ = velocità prodotta dal moto ondoso fuori lo strato limite turbolento
- Ω = frequenza angolare ($2\pi/t$)
- T = periodo dell'onda
- u_{1m} = massima velocità prodotta dal moto ondoso fuori lo strato limite turbolento
- u_f = velocità d'attrito prodotta dal moto ondoso
- k = scabrezza del fondo
- k_v = costante di Von Karman (0.4).

Dopo aver definito:

$$z^0 = \frac{u_0}{u_f} k_v \quad (3.4.2)$$

ed essendo:

$$u = \frac{u_f}{k_v} \ln \frac{z}{k/30} \quad (3.4.3)$$

si ricava l'espressione dello spessore dello strato limite turbolento ponendo $u = u_0$ per $z = \sigma + k/30$ nella (3.4.3):

$$\sigma = \frac{k}{30} [e^{z^0} - 1] \quad (3.4.4)$$

Sviluppando l'integrale a secondo membro della (32) si perviene alla:

$$-u_f^2 = -\sigma \frac{du_0}{dt} + \frac{1}{k_v} \frac{du_f}{dt} \frac{k}{30} [e^{z^0} (z^0 - 1) + 1] \quad (3.4.5)$$

che può essere scritta nella forma:

$$\frac{dz^0}{z(\Omega t)} = \beta \frac{\sin(\Omega t)}{e^{z^0} (z^0 - 1) + 1} - \frac{z^0 (e^{z^0} - z^0 - 1)}{e^{z^0} (z^0 - 1) + 1} \frac{1}{u_0} \frac{du_0}{d(\Omega t)} \quad (3.4.6)$$

nella quale:

$$\beta = \frac{30k_v^2}{k\Omega} u_{1m} \quad (3.4.7)$$

L'equazione (3.4.6) una volta integrata, individua una funzione $z^0(t)$ la cui conoscenza consente di ricavare i valori della velocità d'attrito u_f .

Una volta nota la velocità d'attrito e lo spessore dello strato limite è possibile ricavare l'andamento del coefficiente di diffusività turbolenta, tramite le seguenti espressioni:

$$\varepsilon_w(z) = k_v z u_f \left[1 - \frac{z}{\sigma} \left(1 - \frac{u_{fc}}{u_f} \right) \right] \quad (3.4.8)$$

all'interno dello strato limite turbolento e:

$$\varepsilon_c(z) = k_v z u_{fc} \left[1 - \frac{z}{h} \right] \quad (3.4.9)$$

nella rimanente parte del flusso. Il termine u_{fc} , che compare nelle due equazioni, indica la velocità d'attrito prodotta dalla sola corrente ed è esprimibile, se lo spessore dello strato limite è piccolo rispetto alla profondità, dalla relazione:

$$u_{fc} = \frac{k_v |V_c|}{\left[\ln \frac{h}{k_w/30} - 1 \right]} \quad (3.4.10)$$

in cui:

k_w = scabrezza apparente.

Il valore della concentrazione sul fondo, in condizioni di equilibrio, è esprimibile secondo quanto riportato in (Fredsoe J., Deigaard R., 1981), in funzione della velocità d'attrito prodotta dal moto ondoso per mezzo del parametro di Shields:

$$\Theta^0 = \frac{u_f^2}{(s-1)gd} \quad (3.4.11)$$

in cui:

Θ^0 = sforzo tangenziale sul fondo adimensionale

s = densità relativa

4. Risultati delle simulazioni

4.1 Campi di temperatura e di concentrazione di cloro alla grande scala in condizioni meteorologiche estreme.

Per l'analisi di valutazione di impatto ambientale relativa all'immissione di cloro e alla variazione di temperatura alla grande scala, sono state prese in considerazione le tre condizioni meteorologiche statisticamente più significative, riportate nella seguente tabella.

	Condizione A	Condizione B	Condizione C
Direzione del vento (° Nord)	90°	60°	150°
Altezza d'onda (m)	1.0	1.5	1.5
Velocità del vento (nodi)	12	20	16
Periodo (sec)	6	6	6

Tabella 4.1.1

In figura 4.1.1. è descritto l'andamento del campo d'onda relativo alla condizione A. Da questa figura si osserva che la direzione del campo in vicinanza della linea di costa, dove le profondità sono tali da indurre sensibili effetti di rifrazione e di shoaling, si modifica tendendo a disporsi perpendicolarmente ad essa, con la caratteristica di convergere nel "punto di cuspidè", rappresentato dal capo Punta della Maestra.

La figura 4.1.2 esamina il campo d'onda relativo alla condizione B. In questo caso, alla sinistra del capo Punta della Maestra la direzione predominante del campo, essendo praticamente perpendicolare alla costa, rimane invariata mentre sulla destra si osserva una inversione determinata dal "punto di cuspidè".

In figura 4.1.3 il campo d'onda è relativo alla condizione C. La situazione che si osserva presenta caratteristiche del tutto analoghe al caso precedente ma totalmente invertite a causa della geometria della costa.

Il tempo di simulazione del campo di velocità mediato lungo la profondità per le tre condizioni A, B, C è stato assunto pari a 12 ore.

La persistenza nel tempo di ognuna delle tre condizioni non risulta superiore alle 8 ore (SNAMPROGETTI, 1986): il valore di 12 ore per le simulazioni viene assunto cautelativamente per verificare l'impatto alla grande scala in condizioni estreme.

La figura 4.1.4 descrive il campo di corrente relativo alla condizione A.

Dalla figura si nota che la corrente, al largo, ha direzione perpendicolare mentre in prossimità della costa tende a seguire il profilo della stessa.

La figura 4.1.5 è relativa alla persistenza della condizione meteo-marina B. Si osserva una marcata tendenza del campo di corrente mediato sulla profondità, ad assumere una direzione di 0° N verso il largo mentre lungo la costa, alla destra del capo Punta della Maestra tende a disporsi parallelamente alla stessa e dal lato opposto, invece, si verifica una inversione della direzione di propagazione che genera un ricircolo della corrente, causato, tra l'altro, dalla vicinanza della foce del Po. Tale configurazione risulta spesso quella osservata nel tratto di costa esaminato, anche in relazione alla maggiore frequenza di questa condizione meteo-marina.

In figura 4.1.6 è mostrato il campo di velocità della corrente relativo alla condizione C. In questo caso, al termine della simulazione, il campo generato si dispone ovunque parallelamente alla costa, seguendone il profilo a ridosso della stessa.

Le figure 4.1.7, 4.1.8, 4.1.9 descrivono il campo di variazione di temperatura dovuta all'immissione in mare di acqua a temperatura inferiore rispetto a quella ambiente; le zone a diversa colorazione sono riferite al decremento di temperatura.

La figura 4.1.7 rappresenta il campo di variazione termica relativa alla condizione meteo marina A. Il campo di variazione di temperatura viene simulato integrando le equazioni della temperatura integrate sulla profondità (3.2.2) ove solo nella cella di immissione viene posto diverso da zero l'ultimo termine:

$$\frac{S_T}{\Delta s^2}$$

Il valore della variazione di temperatura anche nella cella di immissione viene prodotto dall'integrazione della suddetta equazione integrata lungo la profondità. Il suddetto valore risulta diverso da quello indicante la differenza tra la temperatura del fluido ambiente e la temperatura del fluido immesso.

Il massimo decremento di temperatura si verifica nella cella corrispondente al punto di immissione ed assume il valore di 0.73 °C (tale valore indica la temperatura mediata su tutto il volume della cella di immissione). La variazione di temperatura rimane circoscritta ad una regione di mare prossima al punto di immissione e non interessa in alcun modo la zona a ridosso della costa.

La figura 4.1.8 mostra il campo di variazione di temperatura relativo alla condizione meteo marina B. I decrementi di temperatura riguardano una striscia di mare di forma allungata in direzione N-S e presentano valori molto bassi. Il decremento di temperatura massimo si verifica nella cella corrispondente al punto di immissione ed è pari 0.085 °C.

La figura 4.1.9 si riferisce alla condizione meteo marina C; anche in questo caso il decremento nel punto di immissione è di circa 0.085 °C.

Le figure 4.1.10, 4.1.11 e 4.1.12 descrivono il campo di concentrazione di cloro, espressa in ppm, prodotto dalla immissione precedentemente esaminata.

I casi esposti fanno riferimento alle stesse condizioni meteo-marine analizzate per le variazioni relative di temperatura. Il campo di concentrazione di cloro viene simulato integrando le equazioni della concentrazione integrate lungo la profondità (3.2.1) ove solo nella cella di immissione viene posto diverso da zero il termine:

$$\frac{S_c}{\Delta s^2}$$

indicante la portata di massa di inquinante immesso .

Il valore della concentrazione di cloro anche nella cella di immissione viene prodotto dall'integrazione della equazione della concentrazione integrata lungo la profondità (3.2.1). Il suddetto valore risulta diverso dal valore della concentrazione di cloro del fluido di immissione.

I campi di concentrazione di cloro presentano un andamento analogo ai campi di variazione termica. Il massimo della concentrazione di cloro si verifica nella cella corrispondente al punto di immissione, dove assume il valore di 0.158 ppm (valore della concentrazione mediata su tutto il volume della cella di immissione) per la condizione meteo-marina A; nelle condizioni B e C il valore calcolato nella medesima cella risulta essere di circa 0.015 ppm.

Dal confronto delle fig. 4.1.7, 4.1.8, 4.1.9 e delle fig. 4.1.10, 4.1.11, 4.1.12 con le corrispondenti figure della relazione del 1998 si evince che i campi di variazione termica integrati sulla profondità e di concentrazione di cloro integrati sulla profondità si presentano diversi da quelli mostrati nelle figure del 1998. Tale diversità dipende, oltre che dai valori differenti delle portate e delle temperature di immissione, anche dal fatto che il punto di immissione è stato spostato di circa 2,6 km verso Nord (a seguito della recente definizione della posizione del Terminale): in tale luogo si verificano differenti valori della profondità e differenti valori dei campi di velocità rispetto alla profondità ed ai campi di velocità prossimi al punto di immissione relativo alla configurazione del 1998. In particolare i campi di velocità (nella nuova configurazione e nell'intorno del nuovo punto di immissione) mostrano una riduzione del valore della componente nella direzione Est-Ovest,

velocità che modifica (per effetto del trasporto convettivo) i campi di variazione termica e di concentrazione di cloro.

Va inoltre aggiunto che i termini convettivi delle equazioni della concentrazione di cloro e della variazione di temperatura vengono (nelle simulazioni attuali) discretizzati con una più moderna metodologia alle differenze finite centrate che rappresenta con maggior precisione i processi di dispersione e diffusione turbolenta nel piano orizzontale.

Tra le situazioni esaminate la più gravosa, in termini di diffusione di cloro e di variazione della temperatura, è quella relativa alla condizione meteo marina B, caratterizzata da un campo idrodinamico più intenso e più complesso. Anche in tale condizione, comunque, i campi di variazione termica e di concentrazione di cloro presentano valori trascurabili.

I risultati delle simulazioni numeriche effettuate portano ad escludere che nelle zone costiere vi siano variazioni di temperatura e di concentrazione di cloro apprezzabili.

4.2 Campi di temperatura e di concentrazione di cloro in prossimità dell'impianto in condizioni di calma di vento e di mare.

Al fine di valutare il massimo impatto ambientale in prossimità dell'opera, è stata indagata una zona rappresentata in pianta da un quadrato di 5 km x 5 km centrato nel punto di immissione (Fig. 4.2.1), utilizzando il modello tridimensionale per l'analisi della diffusione termica e chimica descritto nel paragrafo 3.3.

Sono state analizzate due situazioni: una tipicamente invernale, caratterizzata da assenza di stratificazione termica verticale, ed una tipicamente estiva, ove tale stratificazione risulta presente. Tale stratificazione, riportata nella seguente tabella, è stata ricavata da misure effettuate in corrispondenza del punto di coordinate Lat. 45° 05' 26'' N, Long. 12° 35' 05'' E (D'APPOLONIA).

PROFONDITA' (m)	TEMPERATURA (C°)
0.9	15.420
4.2	15.410
10.0	12.800
16.6	10.390
22.4	10.350
25.7	10.250

Tabella 4.2.1

Per ciascuna delle due situazioni è stata simulata l'evoluzione, durante 48 ore, della concentrazione di cloro e della temperatura in una zona circostante il punto di immissione (Fig. 4.2.1), in condizioni di calma di vento e di mare. Viene assunto pari a 48 ore il tempo di simulazione dei campi di concentrazione di cloro e di temperatura nel dominio tridimensionale poiché la probabilità che una condizione di calma sia di vento sia di mare perduri di più di tale intervallo temporale è pressoché nulla.

In entrambe le situazioni esaminate è stato utilizzato un coefficiente di viscosità turbolenta orizzontale pari a 10 m²/s (valore questo rappresentativo di situazioni di persistenza di calma di vento e di mare) che tiene conto, oltre che dell'effetto di diffusione turbolenta, anche dell'azione

dispersiva della marea; tale coefficiente è stato stimato sulla base delle indicazioni di Okubo (legge dei 4/3) assumendo un tempo caratteristico pari al periodo mareale.

Il coefficiente di viscosità turbolenta verticale è stato posto pari a $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ per la situazione non stratificata, secondo le indicazioni dedotte dalla letteratura, mentre per la situazione stratificata tale coefficiente viene valutato punto per punto in funzione del numero di Richardson.

E' stata utilizzata la tecnica ai volumi finiti, con un grigliato di calcolo a passo spaziale variabile, sia orizzontalmente che verticalmente; il grigliato è stato fortemente infittito in prossimità del punto del dominio di calcolo corrispondente allo scarico, ai fini di cogliere meglio gli effetti determinati dall'immissione nella zona ad essa immediatamente prossima (Figg. 4.2.2.1, 4.2.2.2, 4.2.2.3).

E' stato utilizzato un reticolo costituito da 74×74 celle sull'orizzontale e 13 celle sulla verticale.

La cella di calcolo corrispondente al punto di immissione è la cella (37,37,10). In tale cella si considera l'immissione di acqua

- con portata pari a $8.33 \text{ m}^3/\text{s}$;
- con concentrazione di cloro pari a 1 ppm;
- con Δ termico di $-4.6 \text{ }^\circ\text{C}$ rispetto al punto di prelievo.

Il campo di velocità è diretto secondo l'asse X di riferimento (all'incirca parallelo alla costa) con valori di circa 1 cm/s , sulla base delle valutazioni sulla circolazione geostrofica della regione di mare esaminata (v. par.2.2).

Il cloro viene trattato come una specie conservativa.

Il campo idrodinamico prodotto dalle condizioni al contorno sulle velocità imposte è influenzato dai termini baroclinici prodotti dalle forze di galleggiamento che si generano in conseguenza delle variazioni di densità.

Nelle Figure 4.2.3-4.2.14, che vengono di seguito descritte, sono mostrati i risultati relativi alla situazione caratterizzata da assenza di stratificazione termica iniziale.

La Fig.4.2.3 mostra il campo di variazione termica nella sezione orizzontale passante per il punto di immissione dopo 24 ore: può notarsi come il pennacchio termico si diffonda maggiormente nel verso della corrente a partire dal punto di immissione, per gli effetti convettivi del moto, con un valore massimo di $-1.47 \text{ }^\circ\text{C}$ in corrispondenza della cella di immissione, e valori intorno a $-0.05 \text{ }^\circ\text{C}$ ad 1 km di distanza dall'immissione.

La Fig. 4.2.4 mostra il campo di variazione termica nella sezione longitudinale passante per il punto di immissione dopo 24 ore: anche tale figura evidenzia come il pennacchio si sviluppa sia nel verso della corrente che lungo la verticale.

La Fig. 4.2.5 mostra il campo di variazione termica nella sezione trasversale passante per il punto di immissione, dopo 24 ore: può notarsi come il pennacchio termico si sviluppi, oltre che longitudinalmente, anche in senso trasversale rispetto alla direzione della corrente.

La Fig.4.2.6 mostra il campo di concentrazione di cloro nella sezione orizzontale passante per il punto di immissione dopo 24 ore: il pennacchio di cloro si sviluppa maggiormente nel verso della corrente a partire dal punto di immissione, per gli effetti convettivi del moto. Il valore massimo della concentrazione di cloro si ha nella cella di calcolo corrispondente al punto di immissione ed è pari a 0.30 ppm. Ad 1 km di distanza dall'immissione la concentrazione di cloro è pari a 0.01 ppm.

La Fig. 4.2.7 mostra il campo di concentrazione di cloro nella sezione longitudinale passante per il punto di immissione dopo 24 ore: anche tale figura evidenzia come la diffusione del pennacchio segua principalmente il verso della corrente; la diffusione verticale è analoga a quella della temperatura.

La Fig. 4.2.8 mostra il campo di concentrazione di cloro nella sezione trasversale passante per il punto di immissione, dopo 24 ore: può notarsi come il pennacchio di cloro si diffonda, oltre che longitudinalmente, anche in senso trasversale rispetto alla direzione della corrente.

La Fig.4.2.9 mostra il campo di variazione termica nella sezione orizzontale passante per il punto di immissione dopo 48 ore, ed evidenzia un ulteriore avanzamento del pennacchio termico nella direzione della corrente rispetto alla configurazione a 24 ore, con valori di -0.085 °C ad 1 km di distanza dall'immissione, e valori di -1.49 °C nella cella corrispondente al punto dell'immissione.

La Fig. 4.2.10 mostra il campo di variazione termica nella sezione longitudinale passante per il punto di immissione dopo 48 ore, mettendo in evidenza l'avanzamento del pennacchio.

La Fig. 4.2.11 mostra il campo di variazione termica nella sezione trasversale passante per il punto di immissione dopo 48 ore, senza sostanziali variazioni rispetto alla situazione dopo 24 ore.

La Fig.4.2.12 mostra il campo di concentrazione di cloro nella sezione orizzontale passante per il punto di immissione dopo 48 ore, ed evidenzia un ulteriore avanzamento del pennacchio di cloro nella direzione della corrente rispetto alla configurazione a 24 ore, con valori di 0.016 ppm ad 1 km di distanza dall'immissione, e valori pari a 0.30 ppm nella cella corrispondente al punto di immissione.

La Fig. 4.2.13 mostra il campo di concentrazione di cloro nella sezione longitudinale passante per il punto di immissione dopo 48 ore, mettendo in evidenza l'avanzamento del pennacchio.

La Fig. 4.2.14 mostra il campo di concentrazione di cloro nella sezione trasversale passante per il punto di immissione dopo 48 ore, senza sostanziali variazioni rispetto alla situazione dopo 24 ore.

Nelle Figure 4.2.15-4.2.26, che vengono di seguito descritte, sono mostrati i risultati relativi alla situazione con presenza di stratificazione termica iniziale.

La Fig. 4.2.15 mostra il campo di temperatura nella sezione orizzontale passante per l'immissione dopo 24 ore: in corrispondenza della cella di calcolo relativa al punto di immissione la temperatura subisce un decremento di 2.21 °C; il pennacchio termico, rispetto alla situazione non stratificata, risulta più allungato nella direzione del moto, e ad una distanza di 1 km dal punto di immissione presenta variazioni termiche di -0.80 °C rispetto alla situazione iniziale.

La Fig. 4.2.16 mostra il campo di temperatura nella sezione longitudinale passante per l'immissione dopo 24 ore, e può notarsi come la stratificazione termica iniziale non risulta sostanzialmente modificata, tranne che nella zona in prossimità del punto di immissione.

La stessa osservazione va fatta anche relativamente alla Fig. 4.2.17, che mostra il campo di temperatura nella sezione trasversale passante per l'immissione dopo 24 ore.

La Fig. 4.2.18 mostra il campo di concentrazione di cloro nella sezione orizzontale passante per l'immissione dopo 24 ore: risulta evidente che il pennacchio di concentrazione di cloro è allungato nella direzione del moto, con un valore massimo di 0.32 ppm in corrispondenza della cella di immissione, ed un valore di 0.0175 ppm ad 1 km di distanza da tale punto.

La Fig. 4.2.19 mostra il campo di concentrazione di cloro nella sezione longitudinale passante per il punto di immissione dopo 24 ore; la diffusione del pennacchio lungo la verticale è abbastanza limitata: al fondo le concentrazioni sono notevolmente inferiori rispetto alla superficie.

La Fig. 4.2.20 mostra il campo di concentrazione di cloro nella sezione trasversale passante per il punto di immissione, dopo 24 ore: il cloro si diffonde, oltre che longitudinalmente, anche in senso trasversale rispetto alla direzione della corrente.

La Fig. 4.2.21 mostra il campo di temperatura nella sezione orizzontale passante per l'immissione dopo 48 ore: in corrispondenza della cella di immissione la temperatura subisce una variazione termica di -2.21 °C rispetto al valore iniziale; il pennacchio termico risulta ancora più

allungato nella direzione del moto rispetto alla configurazione a 24 ore, e ad una distanza di 1 km dal punto di immissione presenta variazioni termiche di $-0.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ rispetto alla situazione iniziale.

La Fig. 4.2.22 mostra il campo di temperatura nella sezione longitudinale passante per l'immissione dopo 48 ore. Dopo 48 ore la stratificazione termica iniziale non risulta sostanzialmente modificata, tranne che nella zona in prossimità del punto di immissione.

La stessa osservazione va fatta anche relativamente alla Fig. 4.2.23, che mostra il campo di temperatura nella sezione trasversale passante per l'immissione dopo 48 ore.

La Fig. 4.2.24 mostra il campo di concentrazione di cloro nella sezione orizzontale passante per l'immissione dopo 48 ore: risulta evidente l'ulteriore avanzamento del pennacchio di cloro rispetto alla configurazione a 24 ore, con un valore massimo di 0.32 ppm in corrispondenza della cella di immissione, ed un valore di 0.022 ppm ad 1 km di distanza da tale punto.

La Fig. 4.2.25, che mostra il campo di concentrazione di cloro nella sezione longitudinale passante per il punto di immissione dopo 48 ore, e la fig. 4.2.26, che mostra il campo di concentrazione di cloro nella sezione trasversale passante per il punto di immissione dopo 48 ore, non presentano significative variazioni rispetto alla situazione a 24 ore.

I risultati delle simulazioni mettono in evidenza le differenze esistenti tra le due situazioni esaminate, ovvero in assenza ed in presenza di una stratificazione termica iniziale.

In presenza di stratificazione termica l'azione delle forze barocliniche associate ai gradienti termici presenti lungo la verticale induce una diffusione maggiore sull'orizzontale e minore sulla verticale, risultando comunque in un impatto limitato e trascurabile.

4.3 Valutazione dei fenomeni di risospensione del materiale solido.

I fenomeni di risospensione dal fondo e di trasporto dei sedimenti sono la conseguenza delle azioni dinamiche dovute all'effetto combinato del moto ondoso e delle correnti marine.

Per poter quantificare il grado di suscettibilità dei fondali marini ad essere soggetti a fenomeni di erosione e deposizione, è necessario calcolare l'entità delle azioni tangenziali al fondo che possono essere adeguatamente valutate attraverso la determinazione delle velocità di attrito, prodotte, a loro volta, dal moto ondoso e dalle correnti marine.

I valori delle grandezze suddette, devono essere stimate per le condizioni meteomarine più significative della regione di mare esaminata. Nel caso specifico la condizione meteomarina più significativa, per la zona da noi esaminata, è quella relativa ad un vento di direzione 60° N e ad un moto ondoso caratterizzato da un'altezza d'onda di 1.5 m, una velocità di 20 nodi ed un periodo di 6 secondi, come già visto nel paragrafo 4.1.

Sulla base delle velocità d'attrito prodotte dall'azione combinata del moto ondoso e della corrente è possibile effettuare una stima delle concentrazioni di riferimento al fondo, che si determinano in condizioni di equilibrio, fra il flusso per sedimentazione e il flusso per turbolenza. Nei punti in cui questo valore risulta essere molto piccolo, è evidente l'assenza di sensibili processi erosivi sul fondale.

In riferimento ai problemi relativi all'effetto della presenza dell'impianto di gassificazione, in esercizio od anche durante la sua costruzione, sulla dinamica dei processi erosivi e di accrescimento dei fondali marini, nella regione di mare esaminata, si presentano una serie di simulazioni, basate sul modello descritto nel paragrafo 3.4, in grado di fornire un'indicazione quantitativa in quelle particolari zone soggette ad un più intenso movimento dei sedimenti.

In figura 4.3.1 è descritto il campo di velocità di attrito prodotto dal moto ondoso; come è possibile osservare, le zone interessate dai più alti valori di tali velocità sono quelle che si trovano a ridosso della costa, laddove decresce il rapporto fra profondità e altezza d'onda, queste sono le zone che maggiormente risentono degli effetti del moto ondoso che sono sensibili per un'estensione di circa 1km dalla linea di costa. In corrispondenza del terminale di rigassificazione, il campo d'onda non è in grado di generare significativi effetti di risospensione.

Analogamente in figura 4.3.2 è mostrato il campo di velocità d'attrito prodotto dalla corrente; in questo caso nelle vicinanze del terminale le velocità risultano pari a circa 0.02 m/s. Le regioni con più elevati valori delle velocità di attrito sono ubicate in prossimità della costa.

Tali valori delle velocità di attrito non giustificano fenomeni di sensibile trasporto solido.

Nelle figure 4.3.3 e 4.3.4, invece, sono visualizzati i campi di concentrazione dei solidi sospesi rispettivamente: di riferimento al fondo e nella colonna d'acqua. Come era da prevedersi, relativamente ai campi di velocità d'attrito, le concentrazioni assumono dei valori sensibili esclusivamente vicino la costa.

Si conclude quindi che nel punto di ubicazione dell'impianto non vi è una significativa suscettibilità del fondale ad essere interessato da fenomeni di erosione e di deposizione.

Si esclude, pertanto, che l'opera possa interferire con la dinamica dei sedimenti.

L'unica interferenza prevedibile con la dinamica dei sedimenti può verificarsi solo in fase di costruzione dell'impianto, durante le operazioni di posa in opera della condotta di collegamento a terra, nelle zone più prossime alla costa. Inoltre per le ridotte dimensioni della condotta stessa ($\phi = 750$ mm) si ritiene che la sua presenza non interagisca in alcun modo con la dinamica dei sedimenti costieri, la quale è principalmente condizionata dagli apporti solidi di origine fluviale del Po e dell'Adige limitatamente alla regione interessata dal frangimento d'onda e dalle longshore currents generate dal moto ondoso.

5. Discussione e conclusioni.

La valutazione di impatto ambientale relativa all'impianto off-shore preso in esame, è stata affrontata effettuando tre distinte analisi modellistiche.

Il primo studio è stato rivolto a valutare i campi di concentrazione di cloro e i campi di variazione di temperatura alla grande scala, utilizzando un modello di corrente ed un modello di diffusione, basati sulle equazioni del moto e di bilancio, mediati lungo la profondità.

Come condizioni meteomarine ci si è riferiti alle tre situazioni statisticamente più significative, facenti riferimento ad un vento di direzione rispettivamente 90° N, 60° N e 150° N, associato a dei moti ondosi aventi periodo di 6 secondi ed altezza d'onda massima e velocità massima rispettivamente di 1.5 m e 20 nodi.

In tutte e tre le situazioni si sono osservati, sia per le concentrazioni di cloro che per le variazioni di temperatura nei pressi della costa, valori assolutamente trascurabili e tali da non produrre un impatto ambientale di qualche significato.

Il secondo studio è stato rivolto alla valutazione dei campi di concentrazione di cloro e di variazione della temperatura, limitando l'attenzione alla zona immediatamente prossima al punto di immissione ed utilizzando per tale scopo, un modello tridimensionale di diffusione termica e chimica.

Le caratteristiche meteomarine prese in esame fanno riferimento ad una condizione di calma di vento e di mare.

Sono state analizzate due situazioni: una tipicamente invernale, caratterizzata da assenza di stratificazione termica verticale, ed una tipicamente estiva, ove tale stratificazione risulta presente.

I risultati delle simulazioni mettono in evidenza le differenze esistenti tra le due situazioni esaminate. Nella situazione estiva risulta evidente l'effetto della stratificazione termica verticale, consistente in una diffusione delle specie considerate maggiore sull'orizzontale e minore sulla verticale.

Il terzo studio, infine, è stato riferito alla valutazione dei fenomeni di risospensione del materiale solido. Si sono determinati i campi di velocità d'attrito relativi al moto ondoso e alla corrente nella condizione meteomarina più gravosa: vento di direzione 60° N e moto ondoso avente altezza d'onda di 1.5 m, velocità di 20 nodi e periodo di 6 secondi; conseguentemente sono stati

determinati i campi di concentrazione di riferimento al fondo e dei solidi sospesi in condizioni di equilibrio.

Dai valori delle concentrazioni ottenuti, è stato possibile valutare che i fenomeni di risospensione dei sedimenti non sono significativi nel punto in cui è ubicato l'impianto, mentre risultano più intensi in prossimità della costa. In tali regioni la dinamica dei sedimenti è prevalentemente caratterizzata da fenomeni di risospensione dovuti all'effetto delle longshore currents, prodotte dal moto ondoso e dagli apporti solidi di origine fluviale del Po e dell'Adige.

In tali condizioni non si ritiene che vi siano sensibili interferenze nelle operazioni di posa in opera della condotta sulla dinamica dei sedimenti costieri, dato anche il ridotto diametro della condotta stessa.

Bibliografia.

- Cenedese A., Gallerano F. (1986): “Simulazione numerica di correnti di vento e di marea in aree portuali e lagunari”, *XX Congresso di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Padova.
- Cung-Shang Wu A.M., Liu P.L. (1985): “Finite element modelling of non linear coasted currents”, *J.of Geophysical Research*, Vol.75, pp.6778-6801, London.
- D’APPOLONIA : Relazione tecnica n.1169.
- Falconeer (1980): “Numerical modelling of tidal circulation in harbours”, *J.of the waterway, Port Coastal and Ocean Division*, A.S.C.E., Vol.106 .
- Fletcher C.A.J. (1987): “Computational techniques for fluid dynamics”. Pp.105-120.
- Fredsoe J., Deigaard R.(1981): “Mechanics of coastal sediment transport” - *Advanced Series on Ocean Engineering* - Vol.3
- Gallerano F., Napoli E., Sferruzza V. (1996): “Three-dimensional simulation of free surface hydrodynamic fields using a finite volume method”; 2nd Int. Conference on Hydroinformatics ‘96, Zurigo, Svizzera, 1996.
- Hortmann M., Perc M., Scheuerer G., 1990, “Finite Volume Multigrid Prediction Of Laminar Natural Convection: Bench-Mark Solutions. *International Journal For Numerical Methods In Fluids*”. 11, 189-207.
- Longuet-Higgins M.S. (1970): “Longshore currents generated by obliquely incident sea waves”, *J.of Geophysical Research*, Vol.75, pp.6778-6801, London.
- Morton K.W., Paisley M.F. (1989): “A finite volume scheme with shock fitting for steady euler equations”. *Journal of computational physics*. 80, 168-203.
- Na Y., Yoo J.Y. (1991): “A finite volume technique to simulate the flow of a viscoelastic fluid”. *Computational mechanics*. 8, 43-55.
- Peric M., Kesler R., Scheuerer G. (1988): “Comparison of finite-volume numerical method with staggered and colocated grids”. *Computers & fluids*. 16, 4, 389-403.
- Simon T.J. (1973): “Development of a Three-Dimensional Numerical Model of the Great Lakes” - *Scientific Series No.12, Inland Waters Directorate*.canada Center for Inland Water, Burlington Ontario.
- Simoneau J., Pollard A. (1994) “Finite volume methods for laminar and turbulent flows using a penalty function approach”. *International journal for numerical methods in fluids*. 18, 733-746.

- Sundemann J. (1983): “Numerical modelling of Circulation in Lakes”. *Hydrodynamics of Lakes, Developments in Water Sciences 11*, Elsevier Scientific Publishing Company.
- SNAMPROGETTI (1986): “Caratteristiche meteomarine dell’Adriatico e definizione dei valori estremi” - *Rapporto tecnico*.
- Tjomslund T. (1979): “Simuleringer av. Stromninger i Miosa med en tredimensjonell matematisk modell” - Re. No. A2. 24. NIVA, Norsk Scientific Publishing Company.
- Vijayan P., Kallinderis Y. (1994): “A 3D finite volume scheme for the Euler equations on adaptive tetrahedral grids”. *Journal of computational physics*. 113, 249-267.
- Vinokur M. (1989): “An analysis of finite-difference and finite-volume formulations of conservation laws. *Journal of computational physics*”. 81, 1-52.
- Vreman A.W., Geurts B.J., Kuerten J.G.M., Zandbergen P.J. (1992): “A finite volume approach to large Eddy simulation of compressible, homogeneous, isotropic, decaying turbulence”. *International journal for numerical methods in fluids*. 15, 799-816.
- Zang Y., Street R.L., Koseff J.R. (1994): “A non-staggered grid, fractional step method for time-dependent incompressible Navier-Stokes equations in curvilinear coordinates”. *Journal of computational physics*. 114, 18-33.
- Wang J.C.T., Widhopf G.F. (1989): “A high-resolution TVD finite volume scheme for the Euler equations in conservation form”. *Journal of computational physics*. 84, 145-173.
- Wittmiss J. (1983): “Application of a transient Mathematical Model to Lake Kosen”. *Hydrodynamics of Lakes, Developments in Water Sciences 11*, Elsevier Scientific Publishing Company.